



ВОПНЕРУК АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО  
ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ  
СО СТРУКТУРОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОГО АУСТЕНИТА**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре Литейного производства и упрочняющих технологий ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Фурман Евгений Львович**

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент  
**Валиев Ривхат Мударисович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Коробов Юрий Станиславович**  
кандидат технических наук  
**Банних Сергей Александрович**

Ведущая организация: **ОАО «Уралмашзавод» г. Екатеринбург**

Защита состоится «30» июня 2011 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, ул. Мира, 19, тел./факс (343)3759569, ауд. М-323 (главный учебный корпус, левое крыло).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, ул. Мира, 19, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», учёному секретарю. Факс (343) 374-53-35. E-mail: raskatov@isnet.ru

Автореферат разослан «23» мая 2011 года

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Е.Ю. Раскатов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В большинстве случаев выход из строя деталей машин обусловлен локальным изнашиванием рабочих поверхностей в местах интенсивного взаимодействия с рабочей средой или сопряженной деталью. Экономически и технически обоснованным является конструирование композиционной детали, сочетающей прочную, износостойкую, твердую поверхность нанесенного покрытия с пластичной, вязкой, трещиностойкой основой.

Одним из эффективных способов нанесения покрытий, получивших в настоящее время широкое применение, является газотермическое напыление. В частности, применение метода высокоскоростного газопламенного напыления позволяет получать на изделиях разнообразных форм и размеров сравнительно толстые покрытия с необходимыми эксплуатационными свойствами.

Установки высокоскоростного газопламенного напыления в последнее время довольно широко представлены на рынке. Однако большинство из них предусматривают использование в качестве материала для нанесения покрытия только порошки. Причем, в случае износостойких покрытий, порошки твердых сплавов на основе карбида вольфрама. Применение дорогостоящих порошков значительно увеличивает и без того высокую себестоимость нанесения покрытия. Применение на порядок более дешевых отечественных порошковых проволок из низколегированных сплавов на основе железа, позволяет существенно снизить себестоимость нанесения покрытия, при вполне удовлетворительной износостойкости.

Существенное влияние на качество газотермических покрытий оказывает предварительная подготовка поверхности. Существующие традиционные методы подготовки поверхности (струйно-абразивная обработка, нарезание рваной резьбы и др.) не всегда эффективны, либо их применение в ряде случаев сопряжено со значительными трудностями. Поэтому значительный интерес представляет возможность расширения области применения метода электроискрового легирования (ЭИЛ) в качестве предварительной подготовки поверхности перед газотермическим напылением. Использование быстрорежущей стали как материала электрода при ЭИЛ, позволяет решить эту задачу, обеспечивая высокую адгезионную прочность газотермических покрытий, дополнительно существенно повышая служебные характеристики обрабатываемой поверхности.

В связи с вышесказанным, исследования, направленные на поиск новых технологических решений в данной области, безусловно, являются актуальными.

### **Цель работы.**

Совершенствование технологии высокоскоростного газопламенного напыления для создания высококачественных углеродисто-хромистых покрытий системы Fe-C-Cr-Ti из порошковых проволок на деталях машин и механизмов, работающих в условиях абразивного изнашивания.

Для достижения поставленной цели в процессе выполнения работы решались следующие задачи:

1. Проанализировать существующие представления о механизмах абразивного изнашивания и обосновать выбор эффективного способа и материала для нанесения покрытия.

2. Разработать технологию получения высококачественных покрытий из порошковых проволок системы Fe-C-Cr-Ti методом высокоскоростного газопламенного напыления.

3. Опытнотеоретическим путем определить оптимальные параметры режима напыления.

4. Оценить на основе расчета с использованием математической модели двухфазного потока характеристики гетерофазной струи, получаемые при оптимальных режимах напыления.

5. Провести комплексные исследования по определению физикохимических и служебных характеристик полученных покрытий

6. Разработать технологические основы для применения ЭИЛ быстрорежущей стали в качестве предварительной подготовки поверхности под газотермическое напыление для создания износостойкого комбинированного покрытия.

7. Применить результаты работы для создания промышленной технологии нанесения износостойких покрытий методом высокоскоростного газопламенного напыления из порошковых проволок.

#### **Методики исследования.**

Основными методами исследования служили металлография, растровая электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ, электронная микроскопия, рентгеноструктурный фазовый анализ, дюрометрия, микродюрометрия, механические испытания. Использованы численные методы обработки экспериментальных данных с применением современной компьютерной техники.

#### **Научная новизна работы.**

1. Произведена теоретическая оценка температуры и скорости частиц в гетерофазной струе в процессе высокоскоростного газопламенного напыления;

2. В результате комплексных исследований установлено, что условия, имеющие место в процессе высокоскоростного газопламенного напыления с использованием МАФгаза, приводят к появлению в углеродистохромистых покрытиях системы Fe-C-Cr-Ti повышенного содержания метастабильного аустенита, способного, так же, как и в случае с компактными материалами, претерпевать  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение при деформационном воздействии.

3. Установлено, что применение ЭИЛ быстрорежущей стали в качестве предварительной подготовки поверхности под газотермическое напыление позволяет получать комбинированные износостойкие покрытия путем создания на поверхности основы подслоя с абсолютной адгезией к основе и коэффициентом линейного термического расширения близким к покрытию.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработана технология высокоскоростного газопламенного напыления, позволяющая получать высококачественные покрытия системы Fe-C-Cr-Ti из недорогих порошковых проволок отечественного производства.

2. Исследовано влияние дистанции напыления, скорости подачи порошковой проволоки, расхода рабочих газов и скорости перемещения пятна напыления на качество исследуемых покрытий. Определены оптимальные режимы напыления износостойких покрытий из порошковых проволок системы Fe-C-Cr-Ti, диаметром 1,6, 2,6 и 3,2 мм.



3. Получены газопламенные покрытия, обладающие высокими и достаточными значениями адгезии, твердости и износостойкости, позволяющими с большой эффективностью применять их в различных условиях абразивного изнашивания.

4. Разработан технологический процесс предварительной подготовки поверхности под напыление методом ЭИЛ для создания комбинированных покрытий. Исследованы особенности формирования границы электроискровых покрытий с основным металлом и влияние энергии импульса на глубину зоны термического влияния.

5. Произведены промышленные испытания образцов с покрытиями на ОАО «КГОК «Ванадий» (г. Качканар), упрочненных лопаток ротора эксгаустера на ОАО «ЧМК» (г. Челябинск), полных комплектов упрочненных лопаток на ОАО «ЗСМК» (г. Новокузнецк) и ОАО «ЕМЗ» (г. Енакиево), проведены стендовые испытания восстановленного коленчатого вала на ОАО «5ЦАРЗ» (г. Екатеринбург), а также ходовые испытания восстановленных коленчатых валов на ООО «Уральское УТТ» (г. Урай) и ОАО «Ураласбест» (г. Асбест), которые однозначно подтверждают высокую эффективность применения разработанной технологии для восстановления и упрочнения тяжело нагруженных деталей машин.

6. Разработанный технологический процесс нанесения упрочняющих покрытий на рабочую поверхность лопаток роторов нагнетателей внедрен на ОАО «УЗММ» (г. Верхний Уфалей).

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный технологический процесс нанесения покрытий системы Fe-C-Cr-Ti методом высокоскоростного газопламенного напыления из порошковых проволок.
2. Результаты расчета термокинетического состояния частиц при формировании разработанных покрытий.
3. Результаты комплексных исследований и опытно-промышленных испытаний разработанных газотермических покрытий.
4. Технологическая схема предварительной подготовки поверхности под газотермическое напыление методом ЭИЛ быстрорежущей сталью.
5. Новые практические решения по применению разработанных покрытий с целью увеличения долговечности эксплуатации изделий.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации доложены и обсуждены на региональных, всероссийских и международных научно-технических конференциях и семинарах:

Научно-технические конференции в рамках 7-й, 8-й, 9-й, 10-й специализированных выставок «Сварка. Контроль и диагностика», (Екатеринбург, 2007, 2008, 2009, 2010); I международная научно-техническая конференция «Повышение эксплуатационной прочности металлургического оборудования работающего в тяжело-нагруженных условиях», (Екатеринбург, 2008).; IX Российский семинар «Компьютерное моделирование физико-химических свойств стекол и расплавов», (Курган, 2008); XII Международная научно-практическая конференция «Современные технологии в машиностроении», (Пенза, 2008); Региональная научно-техническая конференция «Наука-образование-производство: опыт и перспектива

развития», (Нижний Тагил, 2009); XVI и XVII Международные конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», (Москва, 2009, 2010); I и II Всероссийские научно-практические конференции «Актуальные проблемы машиностроения» (Самара, 2009, 2010); Международная научно-практическая конференция «Государственное регулирование и стратегическое партнерство в горно-металлургическом комплексе», (Екатеринбург, 2009); I и II Международные научно-практические конференции «Современные технологии дезинтеграции и обогащения: Технологии. Оборудование. Защита от износа. Сервис», (Екатеринбург, 2009, 2010); II Международная научно-производственная конференция «Перспективные направления развития автотранспортного комплекса», (Пенза, 2009); Международная научно-практическая конференция «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». (Кемерово, 2009); Всероссийские научные конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». (Новосибирск, 2009, 2010); 12-я Международная научно-практическая конференция «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня», (Санкт Петербург, 2010) ; Всероссийская научно-техническая конференция «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве», (Орск, 2011).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 34 печатных работы, в том числе 7 в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по каждой главе, общих выводов по работе, библиографического списка из 147 наименований и 7 приложений. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, включает 83 рисунка, 22 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, приведены научные положения, выносимые на защиту, показана практическая значимость результатов работы.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены различные виды и механизмы абразивного изнашивания, а также методы защиты от него. Подробно рассмотрены критерии выбора износостойких материалов. Установлено, что эффективными материалами для защиты в условиях абразивного изнашивания являются материалы, соответствующие принципу метастабильного аустенита

Показана перспективность применения газотермического напыления для повышения абразивной износостойкости деталей машин. Проведен анализ современных методов газотермического покрытий. Подробно рассмотрен метод высокоскоростного газопламенного (HVOF) напыления. Описаны физико-химические процессы, происходящие при напылении (формирование потока напыляемых частиц и процессы, происходящие непосредственно при формировании покрытия). Большое внимание уделено анализу имеющегося оборудования для высокоскоростного газопламенного напыления, а также тенденции его дальнейшего совершенствования.

Рассмотрены модели различного уровня для описания процессов движения и нагрева частиц при газотермическом напылении. Показано, что наряду с трехмерными моделями, созданными в САЕ-системах, могут успешно применяться и существенно упрощенные одномерные модели при соответствующем наборе ограничений и допущений.

Проанализированы особенности электроискрового легирования (ЭИЛ) и перспективность его применения в качестве предварительной подготовки поверхности под газотермическое напыление.

На основе анализа сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** описываются материалы, оборудование и методики, применяемые для исследования.

Материалом исследования служили покрытия, нанесенные методом высокоскоростного газопламенного напыления из порошковых проволок, успешно применяемых для наплавки и дуговой металлизации деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания (табл. 1.).

Таблица 1.

Исследуемые порошковые проволоки

№ п/п	Марка проволоки	Диаметр проволоки	Хим. состав	Производитель
1	ПП-ПМ-6	1,6	65X8T2Ю	Северсталь Метиз
2	ПП-ЗСМ-104	2,6	60X12Д5P2T	Березовский завод сварочных материалов
3	ПП-ЗСМ-111	3,2	65X8T2P	

Напыление образцов для исследований производилось при оптимальных режимах, на подложки из Ст3, с проведением операции предварительной струйно-абразивной обработки поверхности. В отдельных случаях струйно-абразивная обработка заменялась операцией электроискрового легирования быстрорежущей сталью. Операции последующей обработки не производились.

Металлографический анализ осуществляли с применением инвертированного металлографического микроскопа «Olimpus gx-71» при увеличениях 50 - 2000 крат. Подготовка образцов проводилась на специализированном оборудовании фирмы «Struers».

Исследования структуры методами растровой электронной микроскопии выполнялись на микроскопах Philips SEM 535 и Jeol JSM6490LV. После получения растровой микрофотографии на микроскопе Jeol JSM6490LV, проводилось инвертирование фотографий, с целью получения картины, аналогичной фотографиям оптического микроскопа.

Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектральный анализ производили на микроскопе Jeol JSM6490LV с помощью энергодисперсионной приставки INCA Energy + Oxford.

Микрорентгеноспектральный анализ выполняли на растровом электронном микроскопе Philips SEM 535 с помощью приставки Genesis 2000. Параметры съемки выбирались так, что бы область генерации характеристического рентгеновского излучения не превышала 0,5 мкм. В данном случае параметры были следующими: ускоряющее напряжение U=15 кВ, диаметр зонда 100 нм, ток зонда 45 мкА. Количественный анализ проводился по K<sub>α</sub> линии.

Рентгеноструктурный фазовый анализ проводили на дифрактометре XRD-7000 в медном излучении с монохроматором на вторичном пучке. Полученные цифровые файлы обрабатывались с использованием программного обеспечения дифрактометра X-PERT PRO.

Микрозондовый электронный анализ частиц выполнен на аппарате DSM-5900 с определением элементного состава и расчетом окисных фазовых соединений.

Анализ гранулометрического состава образцов частиц, выполняли на седиментографе (SA-CP2). Определение фракционного состава напыляемых частиц осуществляли методом вертикальной вибрации и отсева по ГОСТ 3584.

Элементный анализ образцов покрытия производили различными методами физической и аналитической химии.

Дюрометрические измерения поверхности образцов проводили по методу Роквелла алмазным конусом при нагрузке 1472 Н.

Микродюрометрические измерения поверхности образцов проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1,962 Н.

Пористость покрытий определялась методом гидростатического взвешивания, согласно ГОСТ 18898, а также микроскопическим (металлографическим) методом с помощью промышленного программно-аппаратного комплекса «SIAMS 700» - на базе управляющей программы SIAMS Photolab с комплектом специализированной методики гранулометрического анализа состава пор.

Определение когезионной прочности покрытия проводили испытаниями на растяжение трубчатым методом, аналогично японскому промышленному стандарту H8302.

Испытания на адгезию покрытия к основе проводили по клеевой методике испытания на отрыв, в соответствии со стандартом DIN EN 582 «Testing of thermally sprayed coatings – Determination of adhesive tensile strength», а также по методике испытания на сдвиг (срез).

Испытания покрытий на износостойкость осуществлялось по стандартным методикам при трении о закрепленные, нежестко закрепленные частицы абразива, а также в условиях газоабразивного изнашивания.

Напыление покрытий производили с помощью многофункциональной установки газопламенного напыления "Техникорд ТОП-ЖЕТ/2", которая в штатной комплектации предназначена для распыления шнуровых материалов и проволок сплошного сечения. Наличие в порошковой проволоке оболочки и шихты, имеющих различные теплофизические характеристики, существенно влияет на характер нагрева и плавления указанных проволок по сравнению с цельнотянутыми. Поэтому возникла необходимость оптимизации ключевых параметров процесса напыления. К ним следует отнести: дистанцию напыления (А), расход рабочих газов (В), скорость подачи порошковой проволоки (С) и скорость перемещения пятна напыления (D). В качестве функции отклика и параметра оптимизации была принята относительную износостойкость (J) полученного покрытия при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы (эталона - образец из Ст3 без покрытия).

Оптимизация осуществлялась методом математического планирования эксперимента. В качестве плана эксперимента была выбрана полуреплика от

полного факторного эксперимента  $2^{4-1}$  с двумя промежуточными точками. Обработка экспериментальных данных производилась на ПЭВМ с помощью пакета программ статистической обработки данных STATGRAPHICS XV.I Centurion.

Результаты проведенных опытов для ПП-ПМ-6 представлены математической моделью в виде уравнения регрессии:

$$J = 2,08 - 0,005 \cdot A + 0,35 \cdot B - 0,4 \cdot C + 0,0 \cdot D$$

На параметр оптимизации исследуемые факторы влияют по линейному закону (рис. 1. и рис. 2.)

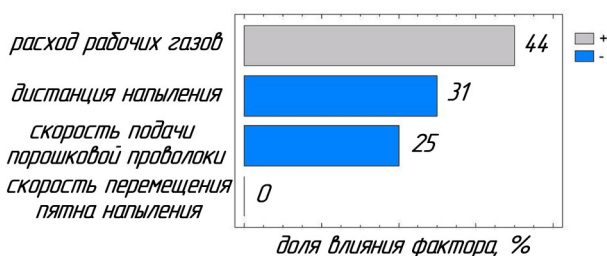


Рис. 1. Вклад исследуемых факторов в дисперсию параметра оптимизации

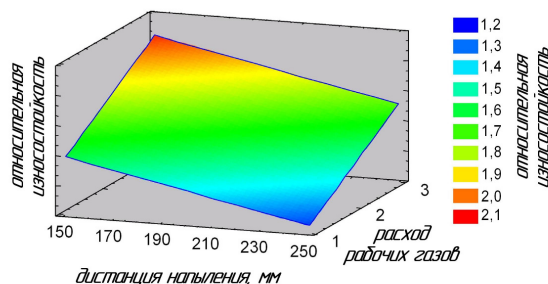


Рис. 2. Влияние наиболее значимых факторов на параметр оптимизации

Аналогичные исследования по оптимизации параметров процесса напыления были проведены и для напыления из порошковых проволок диаметром 2,6 и 3,2 мм (табл. 2.).

Таблица 2.

Оптимальные параметры процесса напыления

Фактор	Диаметр порошковой проволоки		
	1,6 мм	2,6 мм	3,2 мм
1. Дистанция напыления, мм	150		
2. Расход рабочих газов (горючий газ/кислород), м <sup>3</sup> /ч	1,35/7,5		
3. Скорость подачи порошковой проволоки, м/мин	1	0,7	0,4
4. Скорость перемещения пятна напыления, м/с	0,1	0,15	0,25

С целью прогнозирования ключевых характеристик для напыляемых частиц, таких как скорость, температура и степень проплавления, получаемых при оптимальных режимах напыления, был произведен расчет с использованием математической модели двухфазного потока. При расчетах рассматривалась упрощенная одномерная модель ускорения и нагрева частиц потоком нагретого газа:

$$m_q \frac{dv_q}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho_z A_q (v_z - v_q) |v_z - v_q|, \quad \frac{dx_q}{dt} = v_q,$$

$$\alpha A'_q (T_z - T_q) + \varepsilon \sigma_{SB} A'_q (T_z^4 - T_q^4) = \begin{cases} m_q c_{Pq} \frac{dT_q}{dt}, T_q \neq T_{пл} \\ \Delta H_{пл} m_q \frac{df_q}{dt}, T_q = T_{пл} \end{cases}$$

где  $m_q$ ,  $v_q$ , и  $x_q$  - масса, скорость, координата по оси частицы, соответственно.  $A_q$  - площадь поперечного сечения частицы.  $v_z$  и  $\rho_z$  - скорость и плотность газа, соответственно.  $C_D$  - коэффициент лобового сопротивления частицы, зависящий от критерия Рейнольдса,  $c_{pq}$ ,  $\alpha$  и  $A_q'$  - теплоемкость, коэффициент теплоотдачи от газового потока к частице и площадь поверхности частицы, соответственно.  $\varepsilon$  и  $\sigma_{SB}$  - коэффициент, характеризующий степень черноты частицы и постоянная Стефана – Больцмана,  $T_q$ ,  $T_z$ ,  $T_{пл}$  - температура частицы, газа и температура плавления материала частицы, соответственно,  $\Delta H_{пл}$  - энтальпия плавления частицы,  $f_q$  - степень проплавления частицы. Под коэффициентом проплавления в данном случае подразумевается доля частицы, находящаяся в жидком состоянии, вне зависимости от направленности процесса (расплавление или кристаллизация).

Аналитическое решение данных уравнений невозможно в связи со сложными зависимостями всех величин от координаты движения и температуры. Поэтому используем численный метод решения, для чего разобьем интервалы перемещения частиц на такие достаточно малые отрезки  $\Delta x$ , в пределах которых входящие в уравнения величины можно считать

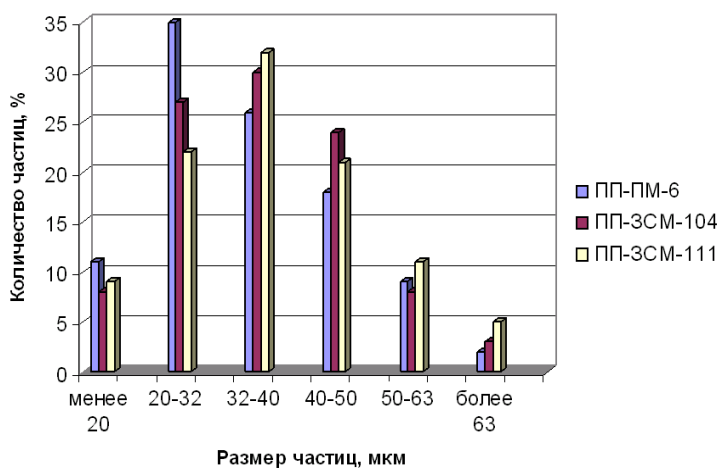


Рис. 3. Распределение частиц по размеру

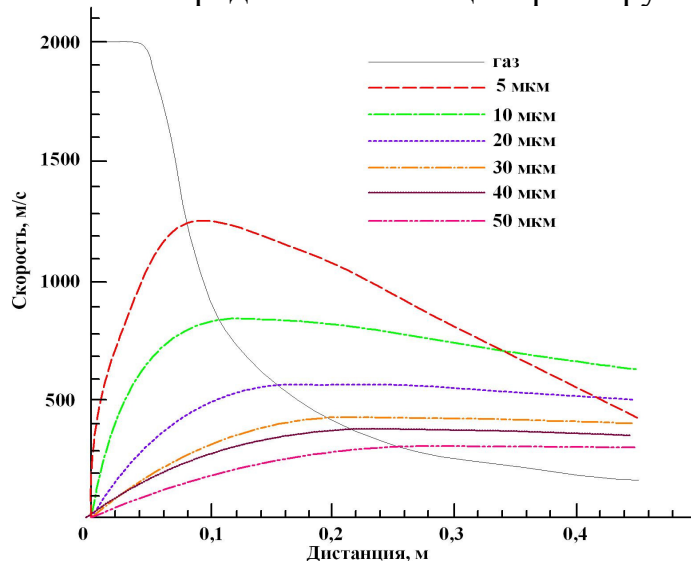


Рис. 4. Изменение скорости частиц при движении в потоке

постоянными. Описанный механизм был реализован путем решения дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты четвертого порядка в математическом пакете MathCAD 14.0

Для определения размеров частиц используемых в расчетах было произведено определение фракционного состава частиц напыленных в воду (рис. 3.). Исследуемые покрытия формируются преимущественно из частиц размером 20 - 50 мкм, причем для ПП-ПМ-6 фракционный состав сдвинут в область 20 - 32 мкм, а для ПП-ЗСМ-104 и ПП-ЗСМ-111 в интервал 32 - 40 мкм.

На рис. 4. и 5. видно, что на расстоянии от среза сопла, равном дистанции напыления, температуры и скорости частиц выравниваются: мелкие уже остывают, а нагрев и ускорение крупных завершается.



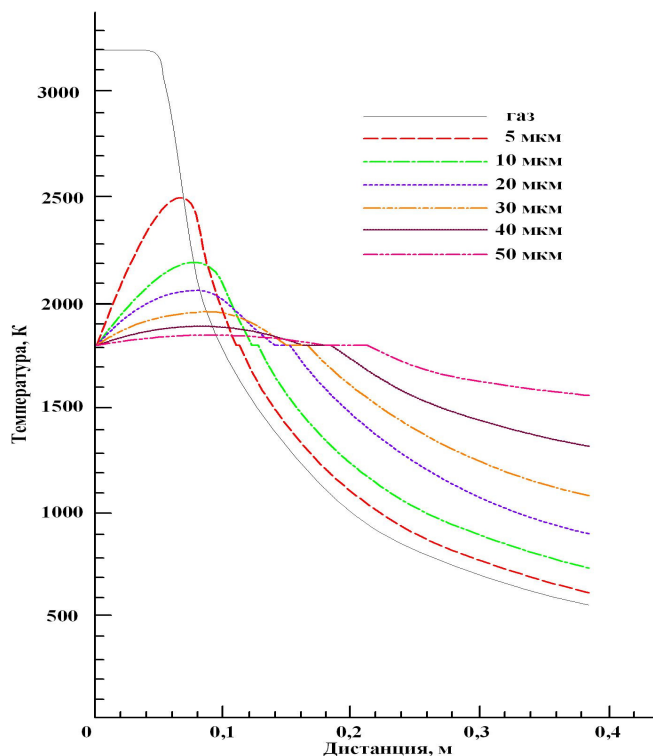


Рис. 5. Изменение температуры частиц при движении в потоке

Анализ термокинетического состояния частиц различного размера в момент контакта с подложкой (рис. 6. и 7.) показал, что благодаря высокой энтальпии плавления ( $8,4 \cdot 10^4$  Дж/кг) и кратковременности полета ( $4 \cdot 10^{-4}$  с), покрытие формируется преимущественно из вязкопластичных частиц ( $0 < f < 1$ ), имеющих высокую скорость (300 - 400 м/с), что предопределяет его высокие когезионные и адгезионные прочностные характеристики.

Сравнительный анализ особенностей микроструктуры напыленных слоев из исследуемых порошковых проволок и схожих микроструктур слоев, получаемых напылением частиц с известными

термокинетическими характеристиками, показал, что результаты проведенного теоретического расчета удовлетворительно согласуются с литературными данными, что является косвенным подтверждением его адекватности.

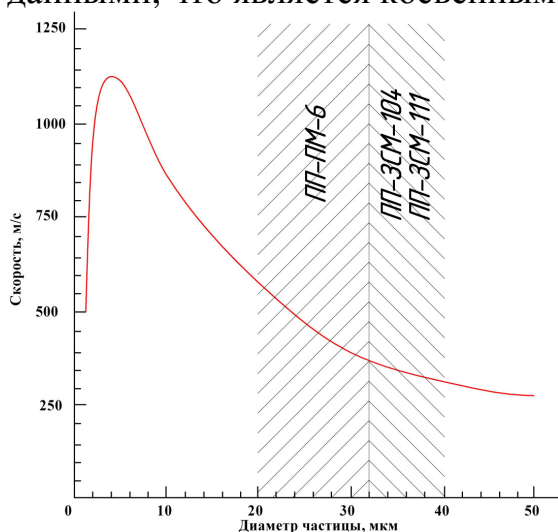


Рис 6. Зависимость скорости частицы от ее диаметра (дистанция 150 мм)

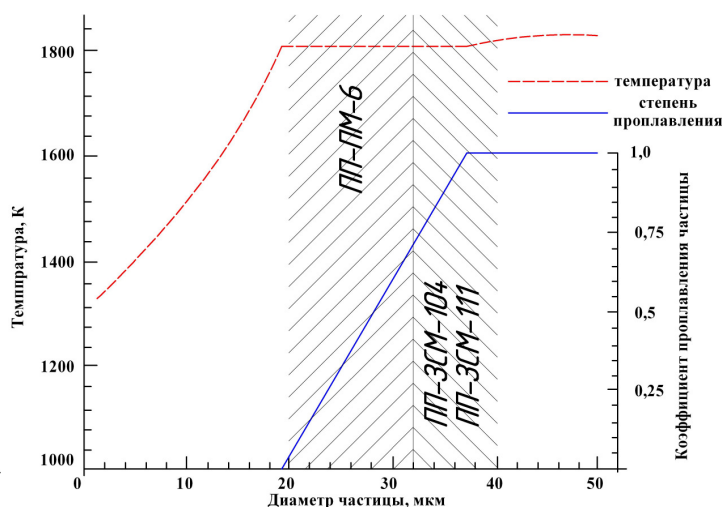


Рис. 7. Зависимость температуры коэффициента проплавления частицы от ее диаметра (дистанция 150 мм)

**В третьей главе** представлены результаты анализа компонентов шихты используемых порошковых проволок, а также комплексных исследований по определению физико-химических, механических и служебных характеристик получаемых покрытий.

Основной задачей анализа компонентов шихты применяемых порошковых проволок являлось выявление крупногабаритных кусков составляющих шихты, точечное зондирование с последующим анализом каждого куска, а также определение общего поля распределения элементов на исследуемом участке шихты.

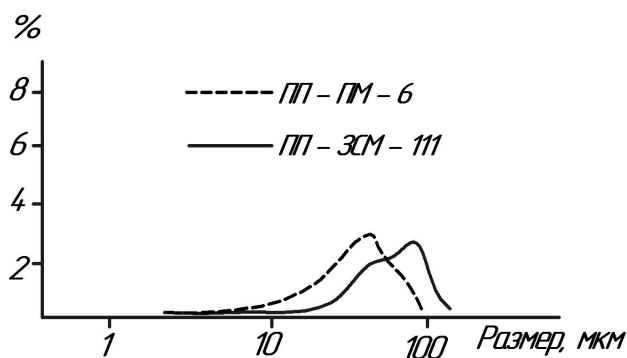


Рис.8. Распределение гранулометрического состава компонентов шихты

Анализ гранулометрического состава образцов шихты (рис. 8.), отметил для ПП-ПМ-6 средний диаметр частиц 60-80 мкм, содержание фракции более 100 мкм. – не более 3%, для ПП-ЗСМ-111 и ПП-ЗСМ-104 средний диаметр частиц 80-100 мкм, содержание фракции более 100 мкм 13% и 7% соответственно. Однако исследование показало, что все порошковые проволоки содержат в составе шихты крупные хромсодержащие частицы, размером от 150 до 400 мкм (рис 9.). Также были выявлены отдельные конгломераты из мелких частиц Al, Cr, Fe, Ti объединенные связующим на основе оксидов Ca и Si, размером до 350 мкм (рис 9.). Полученные результаты удовлетворительно согласуются с результатами ситового анализа напыляемых частиц (рис. 3).

Результаты элементного анализа покрытий табл. 3. подтверждаются результатами энергодисперсионного химического анализа (рис. 10.).

Таблица 3.

Результаты элементного анализа покрытий

№ п/п	Марка проволоки	Содержание элементов в покрытии, %							
		C	Cr	Ti	B	Al	Cu	S	Fe
1	ПП-ПМ-6	0,62	5,49	1,81	-	1,14	-	0,014	ост.
2	ПП-ЗСМ-104	0,82	8,52	2,09	2,03	-	3,57	0,015	
3	ПП-ЗСМ-111	0,51	6,32	1,93	1,15	-	-	0.015	

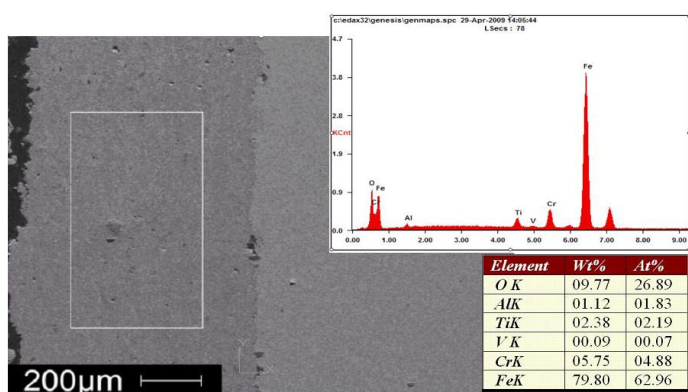


Рис.10. Результаты химического анализа покрытия из ПП-ПМ-6

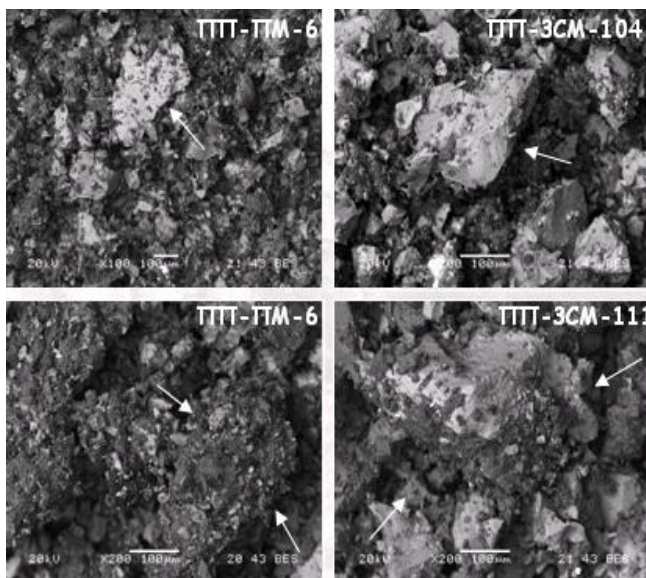


Рис. 9. Крупные компоненты шихты

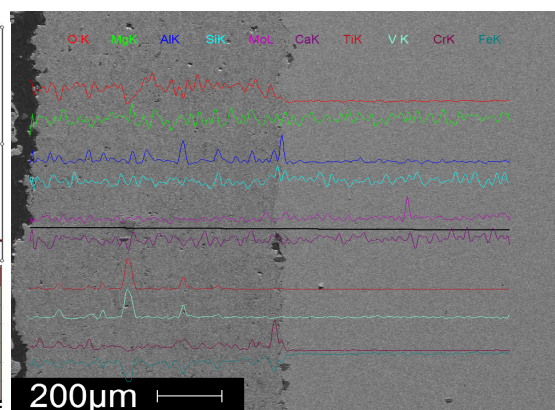


Рис. 11. Сканирование «по линии» образца с покрытием из ПП-ПМ-6



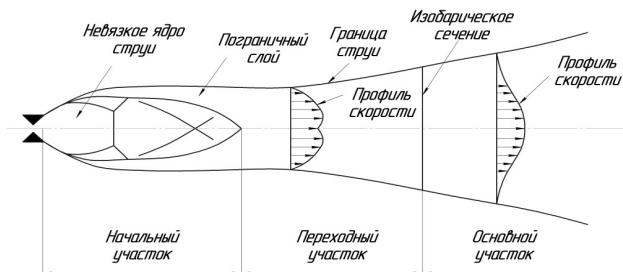


Рис. 12. Схема струи при HVOF напылении

компонентов порошковой проволоки происходит на начальном участке струи (рис. 12), который характеризуется максимальной температурой струи и крайне высокой турбулентностью.

Наблюдающееся волнообразное изменение содержания элементов по линии сканирования, вероятно, объясняется окислением поверхности частиц при формировании покрытия.

По структуре напыленные покрытия представляют собой микрогетерогенный композиционный материал, состоящий из металлических фрагментов частично окисленного металла и окислов средним размером 10...50 мкм, с включениями карбидной (карбоборидной) фазы (рис. 13.).

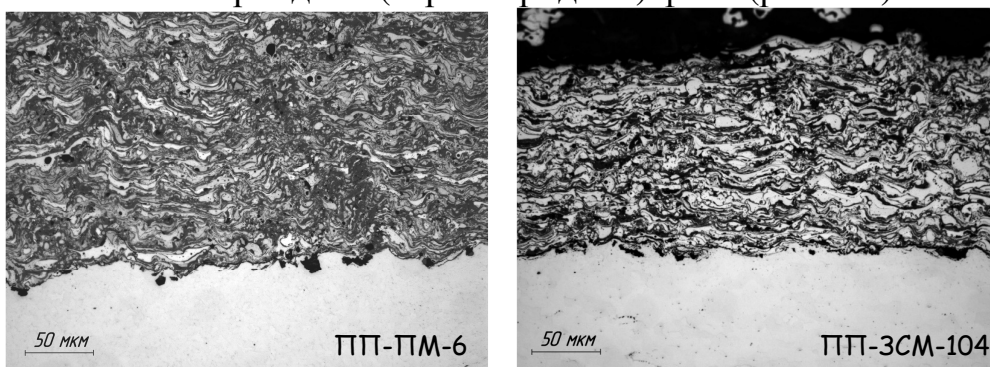


Рис. 13. Микроструктура напыленных слоев

По всей толщине покрытия имеют равномерную структуру, что говорит о стабильности процесса напыления. При этом, чем больше диаметр порошковой проволоки, тем из более крупных частиц формируется покрытие (рис. 13.). Вероятно, это связано с большей долей участия расплавленной оболочки и фракционным составом компонентов шихты порошковой проволоки (рис. 8.), которые подвергается аналогичному тепловому воздействию газового потока с соответствующим образованием более крупных частиц.

Можно предположить, что частицы напыляемого материала, транспортируемые высокоскоростной газовой струей, в процессе столкновения с поверхностью подложки диспергируются и перемешиваются, подвергаясь значительной пластической деформации. В результате формируется специфическая волнистая микроструктура с остаточной пористостью (рис. 14., а). Переходная зона между покрытием и подложкой плотная, без крупных пор и отслоений (рис. 14., б).

На рис. 14. отчетливо наблюдаются характерные светлые и темные области. Проведенный энергодисперсионный химический анализ (рис. 15.) показал, что светлая область содержит неокисленные компоненты, а темная – преимущественно оксидные.

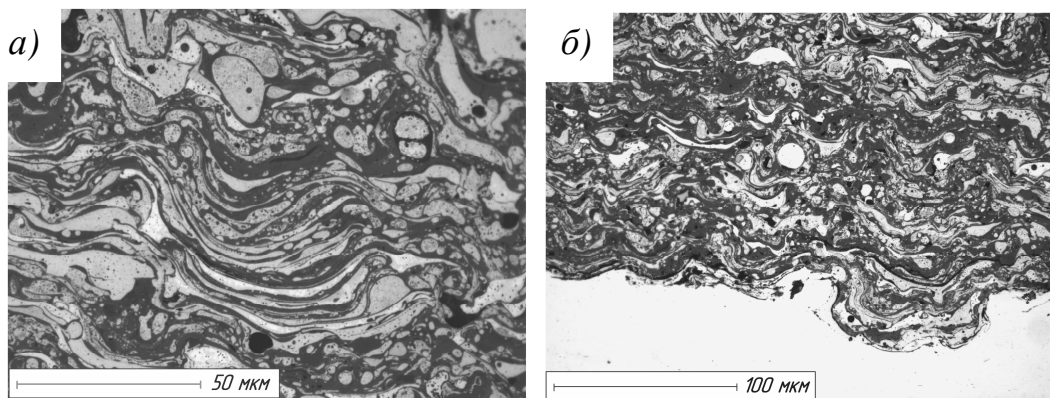


Рис. 14. Микроструктура напыленных слоев из: а) ПП-ЗСМ-111; б) ПП-ПМ-6

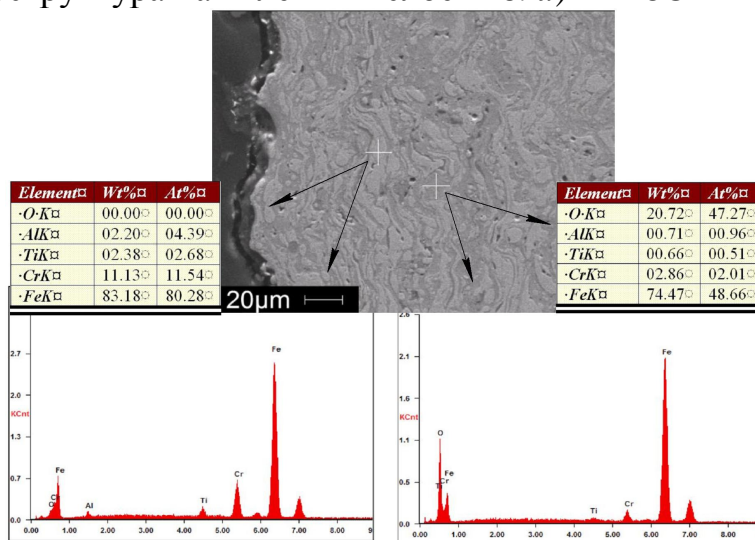


Рис.15. Электронная микроскопия и химический анализ характерных областей структуры покрытия из ПП-ПМ-6

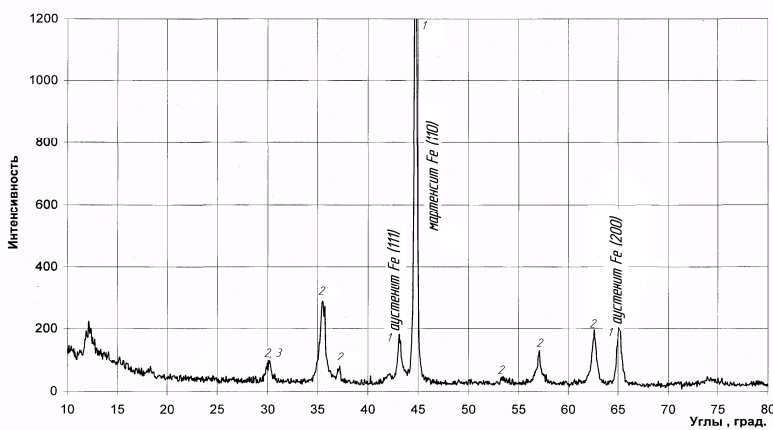


Рис. 16. Фрагмент рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев покрытия из ПП-ПМ-6:

1 – Fe; 2 – шпинели типа  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ;  
3 - карбиды типа  $\text{Fe}_2\text{C}$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$

Рентгеноструктурный анализ покрытий показал, что металлическая основа покрытий системы Fe-C-Cr-Ti имеет аустенитно-мартенситную структуру с включениями карбидной фазы (рис. 16.). Оксидная фаза состоит преимущественно из  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\gamma$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Кроме того, выявлено наличие сложных окислов и шпинелей типа  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ . В покрытиях из порошковых проволок ПП-ЗСМ-104 и ПП-ЗСМ-111,

помимо вышеперечисленных фаз, выявлены карбоборидные эвтектики, а также бориды хрома  $\text{CrB}_2$  и титана  $\text{TiB}$ .

Для определения особенностей формирования покрытия было проведено сравнение результатов рентгеноструктурного фазового анализа образцов, полученных напылением и аргонодуговой наплавкой для каждой исследуемой порошковой проволоки.

Проведенный анализ показал, что в образцах полученных напылением содержится значительно больше аустенита, нежели в слоях, полученных аргонодуговой наплавкой (рис. 17.). Результаты количественного фазового анализа приведены в табл. 4.

Таблица 4.

Сравнение результатов рентгеноструктурного фазового анализа образцов,  
(М – мартенсит, А – аустенит.)

Материал	Метод нанесения	Фаза	Содержание, вес. %	Микронапряжения, %
ПП-ПМ-6	Аргонодуговая наплавка	А	11	0,5
		М	89	0,6
	Напыление	А	45	0,15
		М	55	0,25
ПП-ЗСМ-111	Аргонодуговая наплавка	А	0	-
		М	100	0,2
	Напыление	А	50	0
		М	50	0
ПП-ЗСМ-104	Аргонодуговая наплавка	А	7	0
		М	93	0
	Напыление	А	44	0
		М	56	0

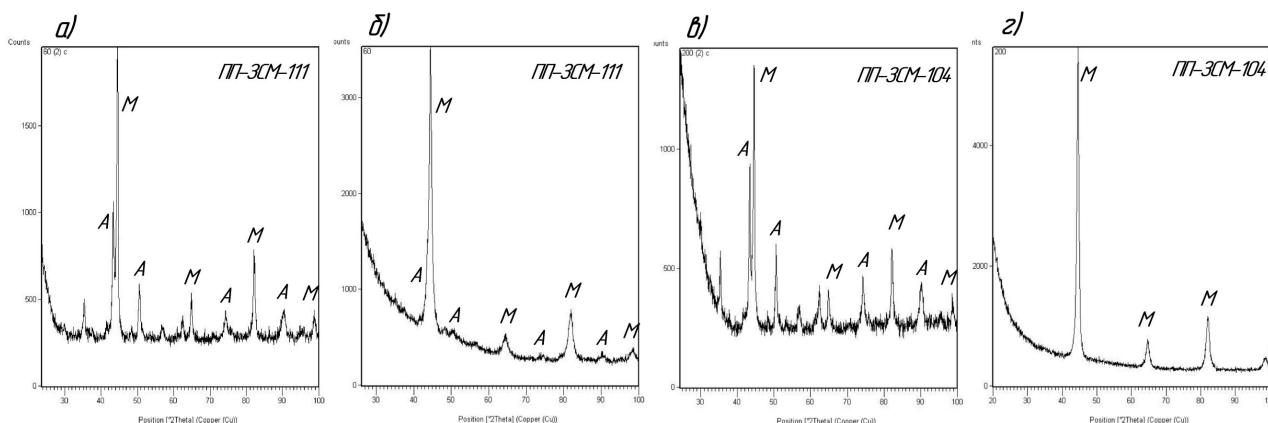


Рис. 17. Фрагмент рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев покрытий (а и в) и аргонодуговой наплавки (б и г): М – мартенсит, А – аустенит

Результаты испытаний на определение пористости покрытий методом гидростатического взвешивания и микроскопическим (металлографическим) методом гранулометрического анализа состава пор представлены на рис. 18. и в табл. 5.:

Таблица 5.

Пористость исследуемых покрытий, объемная доля и размеры пор

Марка проволоки	ПП-ПМ-6	ПП-ЗСМ-111	ПП-ЗСМ-104
Гидростатическое взвешивание			
Пористость, %	1,3	2,1	2,3
Гранулометрический анализ состава по изображению			
Пористость, %	1,8	2,7	3,0
Минимальный размер, мкм	0,3		
Максимальный размер, мкм	12,5	13	16
Средний размер, мкм	1,2	1,2	1,5

Различия между полученными результатами можно объяснить тем, что методом гидростатического взвешивания можно определить лишь открытую пористость, тогда как анализ гранулометрического состава пор по изображению позволяет определить как открытую, так и закрытую пористости.

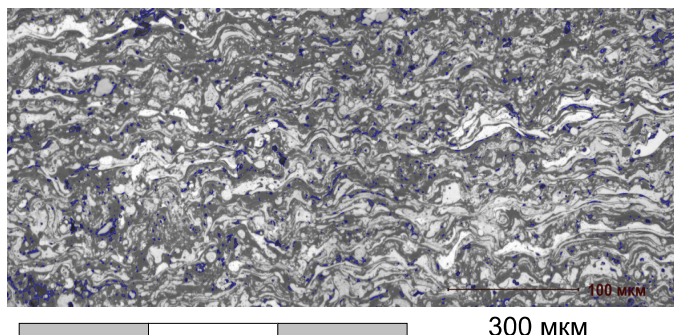


Рис. 18. Анализ гранулометрического состава пор в покрытии из ПП-ПМ-6

Также, при проведении гранулометрического анализа состава пор были определены дифференциальные и интегральные распределения количества, площади и объемов пор по размерам.

Очевидно, что пористость зависит от размера частиц, из которых формируется покрытие. Чем они больше, тем меньше их скорость. Понижение скорости

частиц приводит к огрублению структуры (рис.13.), снижению плотности напыленного слоя и увеличению пористости.

Результаты исследований по определению прочностных характеристик покрытий представлены в таблице 6.

Таблица 6.

Прочностные характеристики исследуемых покрытий

Марка проволоки	ПП-ПМ-6	ПП-ЗСМ-111	ПП-ЗСМ-104
Твердость, HRC	52	51,4	54
Микротвердость, ГПа	6,8	7,1	8,2
Адгезия, МПа	Разрушение по клеевой прослойке (более 68 МПа)		
Когезия, МПа	290	283	287

Важно, что измерение твердости покрытия проводилось аналогично с компактным материалом, без каких-либо пересчетов и корректировок.

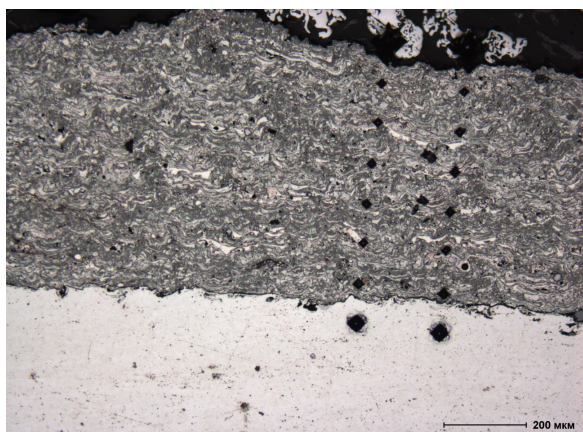


Рис. 19 Микроструктура покрытия из ПП-ПМ-6 после измерения микротвердости

На рис. 19. отображена микроструктура покрытия из ПП-ПМ-6 после микродюрметрических испытаний. Стабильные значения микротвердости свидетельствует о равномерности распространения упрочняющих фаз в покрытии.

Адгезионная прочность исследуемых покрытий, определенная по клеевой методике, превышает 68 МПа.

Когезионная прочность исследуемых покрытий сопоставима с пределом прочности на разрыв компактных материалов (для углеродистых конструкционных сталей  $\sigma_{в.р.} = 320...360$  МПа), что, безусловно, является показателем высокого качества покрытий.

Испытания образцов на износостойкость при трении о закрепленные частицы абразива показали, что износостойкость исследуемых покрытий в 1,7 -



1,8 раза превосходит аналогичное значение для образца эталона (табл. 7. и на рис. 20.). Наибольшей износостойкостью в данных условиях трения обладают покрытия, содержащие боридные фазы.

Таблица 7.

Испытание на изнашивание при трении о закрепленные частицы абразива

Марка проволоки	ПП-ПМ-6	ПП-ЗСМ-104	ПП-ЗСМ-111	Ст3
Относительная износостойкость	1,67	1,86	1,8	1

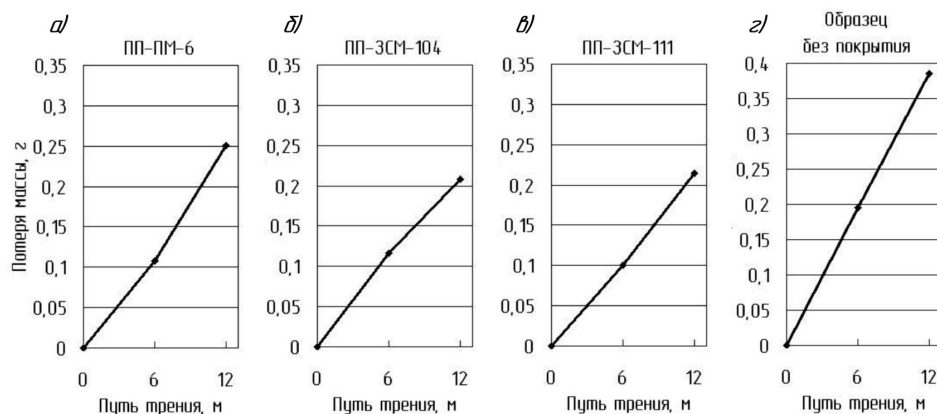


Рис.20. Зависимость потери массы образцов от пути трения:

а – ПП-ПМ-6; б – ПП-ЗСМ-104; в – ПП-ЗСМ-111; г – образец без покрытия

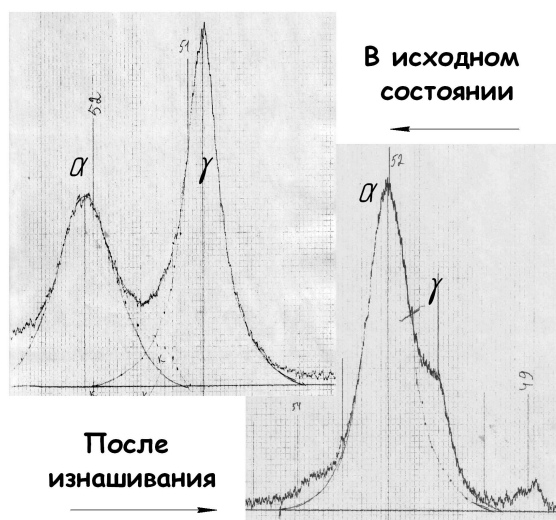


Рис. 21. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев покрытия из ПП-ЗСМ-104

Рентгеноструктурный анализ рабочей поверхности образцов, проведенный до и после изнашивания, показал, что металлическая основа покрытий системы Fe-C-Cr-Ti имеет аустенитно-мартенситную структуру. Количество остаточного аустенита на поверхности образца с покрытием из ПП-ПМ-6 до изнашивания составляет 45%, а мартенсита – 55%. После изнашивания количество аустенита заметно уменьшается, а мартенсита - увеличивается, составляя 25% и 75% соответственно (рис. 21.). Также как и в случае с компактными материалами, это указывает на метастабильность аустенита и его способность к  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращению при царапании и микрорезании абразивными частицами. Это повышает диссипативную

способность структуры и увеличивает ее восприимчивость к деформационному упрочнению, в результате чего средняя микротвердость рабочей поверхности образцов с покрытиями после изнашивания составляет 11 ГПа, в то время как аналогичные значения в исходном состоянии – 6,8...8,2 ГПа (табл. 6.).

Кроме того, при изнашивании регистрируется некоторое возрастание физического уширения дифракционных линий матричной  $\alpha$  фазы, что указывает на увеличение плотности дефектов кристаллической решетки в процессе износа.

Результаты испытания образцов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы представлены в табл. 8. и на рис. 22.

Таблица 8.

Испытание на изнашивание при трении о нежестко закрепленные частицы абразива

Марка проволоки	ПП-ПМ-6	ПП-ЗСМ-104	ПП-ЗСМ-111	Ст3
Относительная износостойкость	2,77	2,01	1,73	1

Наблюдающееся несоответствие значений микротвердости и износостойкости покрытий можно объяснить особенностями микроструктур, различными содержаниями окислов и количеством пор.

Результаты испытания образцов на износостойкость в условиях газабразивного износа представлены на рис. 23.

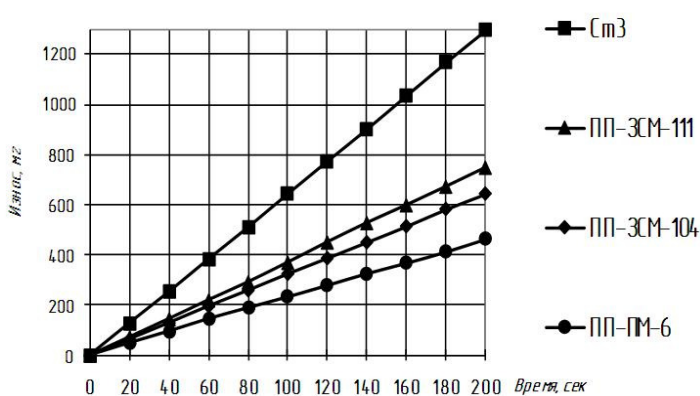


Рис. 22. Результаты испытаний напыленных покрытий на износ при трении о нежестко закрепленные частицы абразива

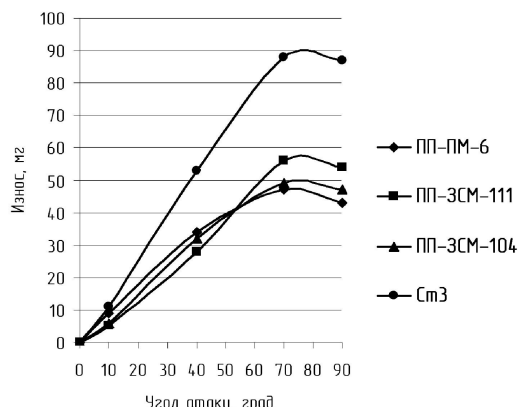


Рис. 23. Результаты испытаний напыленных покрытий на газабразивный износ

Основным изменяемым параметром взаимодействия абразивной частицы с поверхностью образца является угол наклона вектора скорости абразивных частиц к изнашиваемой поверхности (угол атаки). Существуют два крайних случая: угол  $\alpha$  равен  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . Постепенный переход от одного крайнего случая к другому сопровождается качественными и количественными изменениями процесса изнашивания.

Установлено, что практически при любых углах атаки износостойкость всех покрытий почти вдвое превосходит износостойкость образца эталона из Ст3. Однако наибольшей износостойкостью при углах атаки близких к  $90^\circ$  имеет образец с покрытием из ПП-ПМ-6 (рис. 23).

Исходя из того, что абразивная износостойкость является структурно - чувствительной характеристикой, очевидно, что высокая износостойкость исследуемых покрытий объясняется наличием в структуре метастабильного хромистого аустенита, способного при возникновении деформации претерпевать  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, а также карбидных и карбоборидных упрочняющих фаз, причем при газотермическом напылении, по сравнению с наплавкой, имеет место повышенное содержание метастабильного аустенита (табл. 4.). Однако реализовать данный механизм упрочнения за счет  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения удастся лишь благодаря высоким адгезионным и когезионным показателям покрытий, получаемым при высокоскоростном газопламенном напылении на оптимальных режимах.

Так, при возникновении пластических деформаций одновременно с появлением линии деформации происходит более интенсивный, нежели в наплавленных слоях, распад аустенита с образованием мартенсита деформации, выделением мелкодисперсных (вторичных) карбидов хрома по плоскостям скольжения, создание внутренних сжимающих напряжений, положительно сказывающихся на качестве покрытий, происходит значительное перераспределение структурных составляющих.

Мартенситное превращение, протекающее в процессе царапающего действия абразивных частиц, обеспечивает не только упрочнение, но и частичную диссипацию энергии. Поэтому чем выше микротвердость вторичной структуры (мартенсит деформации, карбид хрома), тем с меньшего по глубине слоя происходит отделение частиц износа, и тем выше износостойкость.

Немаловажный структурный фактор повышенной износостойкости исследуемых покрытий связан с большей способностью аустенита, по сравнению с мартенситной основой, удерживать хрупкие карбидные и карбоборидные фазы от выкрашивания под воздействием абразивных частиц.

Присутствие в исследуемых покрытиях такого большого количества метастабильного аустенита объясняется в первую очередь особенностями технологии их нанесения, а также химическим составом порошковых проволок.

Малые объемы частиц ( $d_c = 30 \dots 150$  мкм), высокая степень деформации (растекания) при ударе, микронные значения толщины и исключительно высокий градиент температуры ( $\sim 10^5$  К/с) при теплообмене - именно в подобных термокинетических условиях формируются исследуемые покрытия. В процессе напыления, при охлаждении со скоростями  $10^4 \dots 10^6$  К/с, когда фиксируется переход от сегрегационной к бездиффузионной перекристаллизации, часть напыляемого материала не испытывает  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. Кроме того, при анализе причин стабилизации аустенита в напыляемом материале необходимо иметь ввиду, что в процессе нанесения покрытия, его поверхностные слои разогреваются до температур  $500 \dots 670$  К, что способствует термической стабилизации аустенита.

Высокая скорость частиц в процессе напыления не только способствует стабилизации аустенита, но и обеспечивает условия для формирования покрытий с высокими адгезионными и когезионными прочностными характеристиками.

Присутствие небольшого количества пор в покрытии придает им высокую маслоудерживающую способность по сравнению с компактными материалами. Поэтому для деталей триботехнических узлов с напыленными покрытиями в условиях трения со смазкой существенно увеличиваются износостойкость и допускаемая мощность трения.

Также, в третьей главе представлены результаты исследований по применению электроискрового легирования быстрорежущей стали в качестве предварительной подготовки поверхности под газотермическое напыление.

В ряде случаев, для существенного повышения износостойкости тяжело-нагруженных деталей, применяют технологию нанесения комбинированных покрытий. Так, помимо газотермического покрытия, для защиты входной кромки лопаток ротора эксгаустера, было решено произвести ее наплавку самофлюсующимся сплавом на никелевой основе. Существенные различия

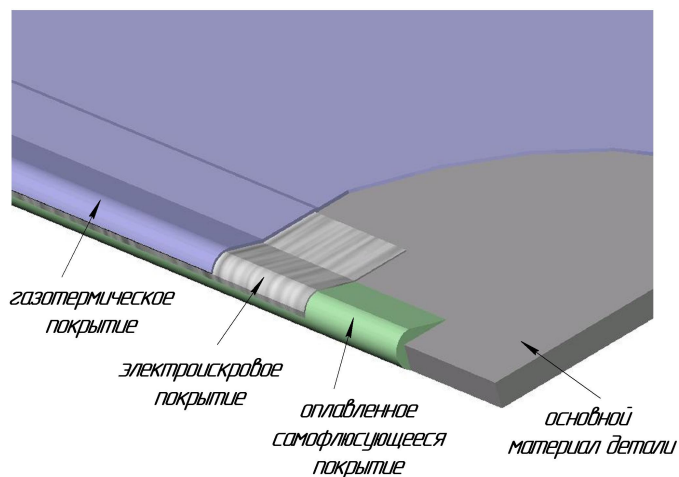


Рис. 24. Схема комбинированного покрытия

коэффициентов линейного термического расширения материалов газотермического ( $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и оплавленного самофлюсующегося ( $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) покрытий делают практически невозможным создание качественного комбинированного покрытия. Эффективным решением данной проблемы является создание на поверхности основы подслоя с абсолютной адгезией к основе и коэффициентом линейного

термического расширения близким к покрытию, путем электроискрового легирования быстрорежущей сталью (рис. 24.).

В ходе проведения исследований по применению электроискрового легирования быстрорежущей сталью в качестве предварительной подготовки поверхности под газотермическое напыление, подложка из Ст3 подвергалась предварительной подготовке методом ЭИЛ. В качестве материала анода была использована быстрорежущая сталь Р18. Последующее нанесение газотермического покрытия осуществлялось методом высокоскоростного газопламенного напыления.

Результаты металлографических исследований представлены на рис. 25.

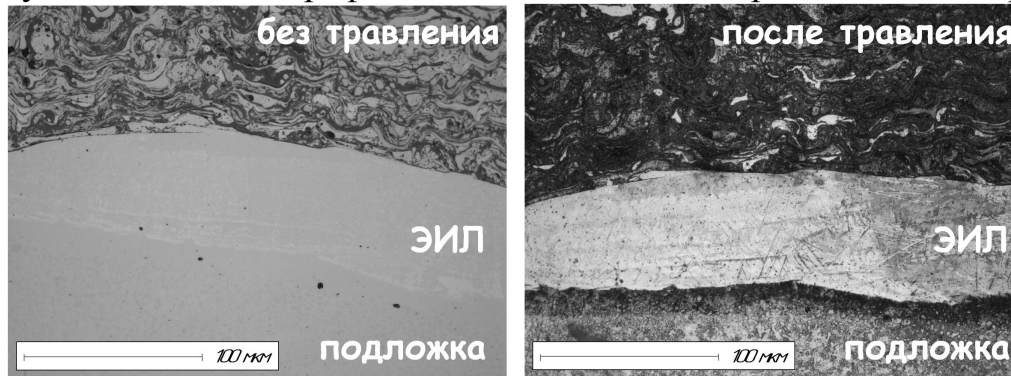


Рис. 25. Металлография комбинированного покрытия ЭИЛ – HVOF напыление

Получаемое комбинированное покрытие имеет две границы «покрытие - основа». Граница между подложкой и электроискровым покрытием не имеет видимых дефектов и практически не различима без травления шлифа. Граница между газотермическим и электроискровым покрытием также очень хорошо сформирована, отслоений и крупных пор не наблюдается.

Адгезионная прочность исследуемых комбинированных покрытий определенная по клеевой методике превышает 68 МПа, что, безусловно, является показателем высокого качества.

Применение ЭИЛ быстрорежущей сталью в качестве предварительной подготовки поверхности под газотермическое напыление позволяет получать комбинированные износостойкие покрытия путем создания на поверхности основы подслоя с абсолютной адгезией к основе и коэффициентом линейного термического расширения близким к покрытию.



В четвертой главе представлены результаты практического применения исследуемых покрытий.

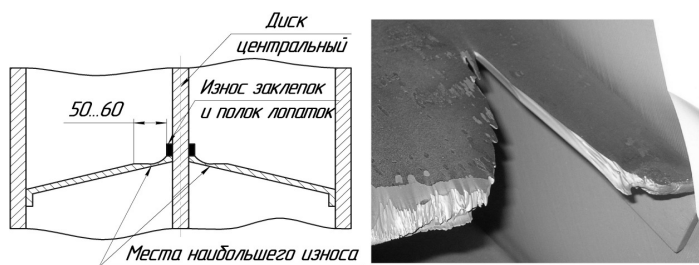


Рис. 26. Характер износа лопаток

В первой подглаве представлены результаты исследований по разработке технологии упрочнения лопаток роторов нагнетателей в агломерационном производстве. Приведены результаты исследований по определению причин их повышенного износа (рис. 26.), включающий комплексный анализ аглопыли, и модельный расчет скорости потока (рис. 27.) с использованием расчетного модуля, интегрированного в программный комплекс ANSYS

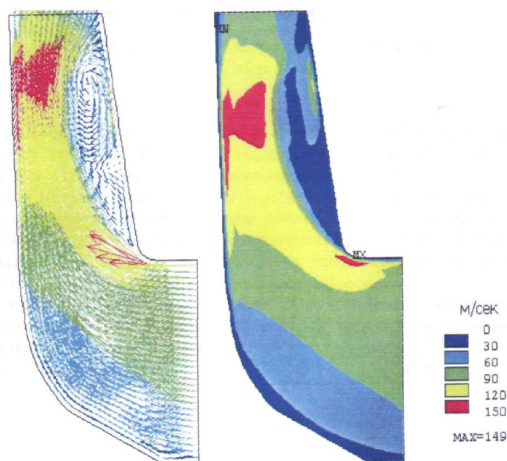


Рис. 27. Распределение скорости газа в роторе

Представлены результаты испытаний покрытий в реальных условиях эксплуатации нагнетателя на фабрике окускования (цех агломерации) ОАО «КГОК - «Ванадий» (табл. 9. и рис. 28.).

Образцы размером 150×150 из стали 30ХГСА были подвергнуты предварительной пескоструйной обработке с последующим нанесением покрытий различными способами толщиной от 0,1 до 2 мм. Образцы были размещены на улите внутри нагнетателя Н-9000 в области наибольшего износа (на языке улиты). По приблизительным оценкам, условия на языке улиты нагнетателя примерно в 1,5 раза жестче, чем условия эксплуатации лопаток ротора нагнетателей. Средняя наработка роторов нагнетателя на период исследований составляла 1700 часов.

Таблица 9.  
Результаты промышленных испытаний в условиях ОАО «КГОК-«Ванадий»

Тип футеровки	Наработка, ч
Эмалирование	менее 648
ЭИЛ	1579
HVOF напыление (ПП-ПМ-6)	3600
Наплавка релитом	Более 3600

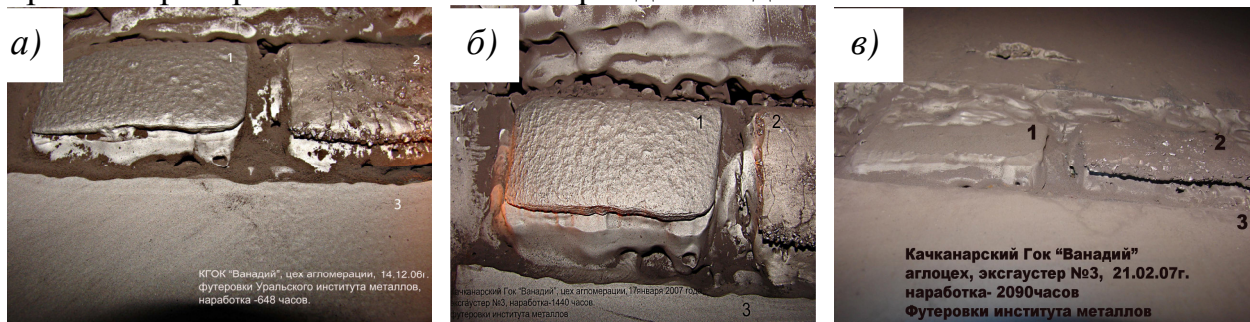


Рис. 28. Общий вид футеровок (1 – ПП-ПМ-6; 2-релит; 3 – эмаль) после наработки :а – 648 часов , б – 1440 часов, в – 2090 часов

Как результат, приведен технологический процесс упрочнения лопаток ротора нагнетателей, основанный на проведенных исследованиях. Проведенные эксплуатационные испытания роторов с упрочненными лопатками показали

увеличение наработки роторов в 1,5...2 раза, по сравнению с неупрочненными роторами.

Во второй подглаве приведены примеры применения исследуемых покрытий для восстановления и упрочнения деталей, работающих в условиях трения скольжения (рис. 29.)

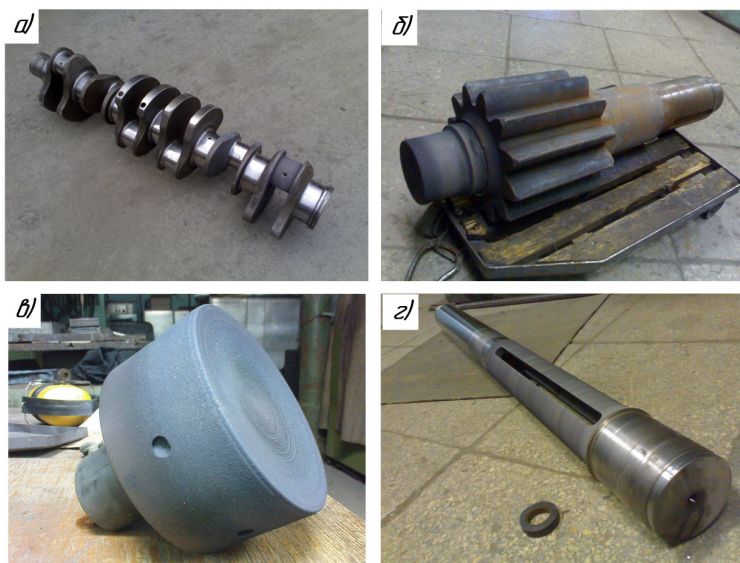


Рис. 29. Примеры применения исследуемых покрытий

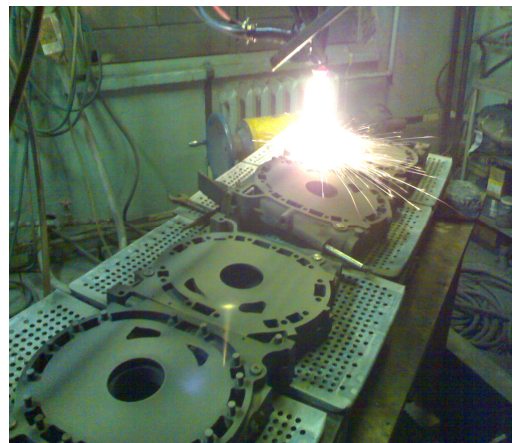


Рис. 30. Восстановление рабочей поверхности корпусных деталей (крышек) роторно-поршневых двигателей «Mazda»

Перспективным направлением является восстановление рабочей поверхности блоков роторно-поршневых двигателей (рис. 30.). В настоящее время было восстановлено 9 комплектов крышек. Двигатели проходят ходовые испытания, после 35000 км компрессия достигла максимального значения (8,3), характерного для нового двигателя и вплоть до настоящего времени (60000 км) остается неизменной, что свидетельствует об отсутствии сколько-нибудь значимого износа, а, следовательно, и о высоком качестве нанесенных покрытий. Следует отметить, что ресурс заводских крышек при эксплуатации на территории РФ не превышает 50000 км пробега.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ литературных данных показал, что абразивная износостойкость стали является структурно-чувствительной характеристикой, поэтому эффективными износостойкими покрытиями являются покрытия, отвечающие принципу метастабильного аустенита, способные упрочняться под воздействием рабочих нагрузок в процессе эксплуатации.

2. Разработана технология высокоскоростного газопламенного напыления, позволяющая получать высококачественные покрытия системы Fe-C-Cr-Ti из недорогих порошковых проволок отечественного производства. Оптимизированы параметры процесса напыления. Максимальное значение параметра оптимизации (относительной износостойкости) достигается при дистанции напыления - 150 мм, расходе рабочих газов (МФ газ/кислород) – 1,35/7,5 м<sup>3</sup>/ч, а также минимально возможной, при сохранении высокого качества покрытий, скоростью подачи порошковой проволоки для каждого диаметра.

3. Расчет температуры и скорости частиц по оси струи, показал, что при напылении на оптимальных режимах, благодаря высокой энтальпии плавления ( $8,4 \cdot 10^4$  Дж/кг) и кратковременности полета частиц ( $4 \cdot 10^{-4}$  с), формирование покрытия происходит преимущественно из вязкопластичных частиц ( $0 < f < 1$ ), имеющих высокую скорость (300 - 400 м/с), что предопределяет его высокие когезионные ( $\sim 290$  МПа) и адгезионные (более 70 МПа) прочностные характеристики.

4. Комплексное исследование показало, что условия, имеющие место в процессе высокоскоростного газопламенного напыления с использованием МАФ-газа, приводят к появлению в углеродисто-хромистых покрытиях системы Fe-C-Cr-Ti повышенного содержания метастабильного аустенита, способного, также как и в случае с компактными материалами, претерпевать  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение при деформационном воздействии, что объясняет высокую износостойкость исследуемых покрытий в условиях абразивного изнашивания. Однако реализовать данный механизм упрочнения за счет  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения удастся лишь благодаря высоким адгезионным и когезионным показателям покрытий, получаемым при высокоскоростном газопламенном напылении при оптимальных режимах.

5. Установлено, что применение ЭИЛ быстрорежущей стали в качестве предварительной подготовки поверхности под газотермическое напыление позволяет получать комбинированные износостойкие покрытия путем создания на поверхности основы подслоя с абсолютной адгезией к основе и коэффициентом линейного термического расширения, близким к покрытию.

6. Произведены промышленные испытания образцов с покрытиями на ОАО «КГОК «Ванадий» (г. Качканар), упрочненных лопаток на ОАО «ЧМК» (г. Челябинск) и двух полных комплектов упрочненных лопаток на ОАО «ЗСМК» (г. Новокузнецк) и ОАО «ЕМЗ» (г. Енакиево), стендовые испытания восстановленного коленчатого вала на ОАО «5ЦАРЗ» (г. Екатеринбург), а также ходовые испытания восстановленных коленчатых валов на ООО «Урайское УТТ» (г. Урай) и ОАО «Ураласбест» (г. Асбест), которые однозначно подтверждают высокую эффективность применения разработанной технологии для восстановления и упрочнения тяжело нагруженных деталей машин. Разработанный технологический процесс нанесения упрочняющих покрытий на рабочую поверхность лопаток роторов нагнетателей внедрен на ОАО «УЗММ» (г. Верхний Уфалей).

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Вопнерук А.А., Валиев Р.М., Шак А.В., Ведищев Ю.Г., Купцов С.Г., Фоминых М.В., Мухинов Д.В. Иванов А.В. Абразивная износостойкость покрытий, нанесенных методом высокоскоростного газопламенного напыления // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, № 1 (22). С. 317-320

2. Вопнерук А.А., Валиев Р.М., Купцов С.Г., Мухинов Д.В., Фоминых М.В. Упрочнение деталей машин и механизмов, работающих в условиях абразивного износа методом высокоскоростного газопламенного (HVOF) напыления. // Известия Самарского научного центра РАН. Спецвыпуск «Актуальные проблемы машиностроения», 2009. С. 76-78

3. Толстых Л.Г., Толстых А.Л., Вопнерук А.А. Исследование влияния энергии импульса на частоту и плотность тока при ЭИЛ // Ремонт восстановление и модернизация. 2011, № 3. С. 37-40.
4. Толстых Л.Г., Толстых А.Л., Вопнерук А.А. ЭИЛ быстрорежущей сталью на установках ИНТАЛ – 1500 и ИНТАЛ – 3000 // Ремонт восстановление и модернизация. 2009, № 10 С. 17-20.
5. Купцов С.Г., Валиев Р.М., Вопнерук А.А., Мухинов Д.В., Фоминых М.В. Способы повышения эксплуатационной прочности деталей машин модифицированием поверхности. // Известия Самарского научного центра РАН. Спецвыпуск «Актуальные проблемы машиностроения», 2009. С. 34-36
6. Вопнерук А.А., Валиев Р.М., Базилевский А.А. Применение газотермических покрытий для защиты от абразивного износа// Арматуростроение. 2010. № 4 (67). С. 68 – 72.
7. Вопнерук А.А., Валиев Р.М., Базилевский А.А. Высокоскоростное газопламенное напыление с использованием порошковых проволок// Сварщик. 2010. № 5 (75). С. 11 – 13.
8. Вопнерук А.А. Математическое моделирование гетерофазной струи в высокоскоростном газопламенном (HVOF) напылении.// Материалы докладов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов -2009», Секция «Физика»/ М.: Изд-во Физического факультета МГУ, 2009. С. 71-72
9. Валиев Р.М., Вопнерук А.А. Повышение износостойкости рабочих поверхностей деталей машин, нанесением углеродисто-хромистых газотермических покрытий // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: сборник трудов Международной научно-практической конференции. Кемерово: ГУ КузГТУ, 2009. С. 65 – 74
10. Вопнерук А.А., Валиев Р.М., Ведищев Ю.Г. Влияние структуры на износостойкость покрытий, полученных методом высокоскоростного газопламенного напыления // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. В 4 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Ч. 1 С. 178 – 179
11. Вопнерук А.А., Валиев Р.М., Шак А.В., Ведищев Ю.Г., Купцов С.Г., Фоминых М.В., Мухинов Д.В. Иванов А.В., Применение углеродисто-хромистых газотермических покрытий для защиты от абразивного износа // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: материалы 12-ой Международной научно-практической конференции. В 2 ч. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. Ч. 1. С. 52 – 57

Отпечатано в типографии  
ООО «Издательство УМЦ УПИ»  
620078, Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2.  
тел. (343) 362-91-16, 362-91-17  
Заказ 3301 Тираж 150